

Układ sterowania i monitorowania pracy przekształtników układu napędowego maszyny wyciągowej prądu stałego

Artur Kozłowski, Tomasz Gąsior, Jerzy Zdrzałek

1. Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych obiektów w kopalniach głębinowych węgla kamiennego jest maszyna wyciągowa, służąca do transportu szybowego. Podstawowym zadaniem technologicznym tego transportu w kopalniach jest podnoszenie urobku, opuszczanie i podnoszenie materiałów, maszyn i urządzeń oraz transport ludzi. Do napędu maszyn wyciągowych stosuje się wszystkie podstawowe rodzaje silników elektrycznych, tzn. silniki prądu stałego i silniki prądu zmiennego – synchroniczne i asynchroniczne [1]. Układy napędowe stosowane w maszynach wyciągowych to:

- układ Leonarda;
- napęd asynchroniczny z regulacją oporową;
- tyrystorowy napęd prądu stałego (przekształtnikowy);
- napęd asynchroniczny w układzie kaskady tyrystorowej;
- napęd asynchroniczny z przemiennikiem częstotliwości;
- napęd cyklokonwertorowy z silnikiem synchronicznym lub asynchronicznym.

Największe krajowe maszyny wyciągowe napędzane są silnikami prądu stałego, które w maszynach sprzed kilkudziesięciu lat są sterowane w układzie Leonarda. Maszyny te, zarówno ze względu na stan techniczny, jak i na niską sprawność, są obecnie modernizowane, a w ich układach napędowych stosowane są przekształtniki tyrystorowe prądu stałego. Posiadają one większą liczbę zalet układów Leonarda, a ponadto mają wyższą spraw-

Streszczenie: W referacie przedstawiono przekształtnikowe układy sterowania stosowane w napędach głównych maszyn wyciągowych prądu stałego. Zaprezentowano układ sterowania układu przekształtnikowego oraz przedstawiono zalety i możliwości sterowania mikroprocesorowego tych napędów w zastosowaniu do maszyn wyciągowych. Przedstawiono możliwe tryby sterowania, ich zalety, wady oraz zagrożenia wynikające z oddziaływania napędu przekształtnikowego na sieć zasilającą w zależności od wybranego trybu. Przedstawione zostały również metody zapewnienia odporności napędu przekształtnikowego na zaburzenia niskiej częstotliwości oraz sposoby ich realizacji cyfrowej w sterowniku przekształtnika napędu maszyny. W krótkim podsumowaniu przedstawiono zalety zastosowania napędu przekształtnikowego zarówno w aspekcie oszczędności energii, jak i uzyskiwanych parametrów pracy maszyny.

ność. Innymi zaletami tych napędów są łatwość konfiguracji układu regulacji ze sprzężeniem prądowym i prędkościowym, pozwalającym na dokładną realizację zadanego diagramu prędkości jazdy, możliwość przełączania struktury układu regulacji w trakcie jazdy w celu uzyskania optymalnych w danym momencie parametrów dynamicznych, łatwą nastawę i kontrolę maksymalnych wartości prądu obwodu głównego, możliwość realizacji rewersji momentu napędowego oraz bardzo szeroki zakres monitorowania i kontroli wszystkich wielkości i parametrów istotnych w pracy napędu. Wszystkie te zalety są możliwe do uzyskania dzięki powszechnemu zastosowaniu mikroprocesorowych układów sterowania.

Wymienione cechy pozwalają napędowi maszyny wyciągowej spełnić następujące wymagania:

- regulacji prędkości obrotowej w pełnym zakresie, tj. od $n = 0$ do $n = n_N$;
- pracy 4-kwadrantowej, tzn. pracy silnikowej i hamulcowej z odzyskiem energii w obydwu kierunkach;
- wysokiej dynamiki napędu;
- możliwości bardzo wolnej jazdy w czasie prac szybowych, rewizji liny lub szybu;
- możliwości automatyzacji procesu transportu pionowego (załadunek, jazda maszyny i wyładunek urobku).



Rys. 1. Zestaw sterujący maszyną jednosilnikową wyciągową o mocy 2000 kW

Wady napędu przekształtnikowego wiążą się bezpośrednio z użyciem przekształtników statycznych, powodujących zwiększenie poboru mocy biernej, zwłaszcza występowanie jej udarów w czasie rozruchu oraz występowanie wyższych harmonicznych w prądzie sieci zasilającej.

2. Ogólna charakterystyka przekształtnika

Prądy znamionowe wolnoobrotowych silników prądu stałego, stosowanych w maszynach wyciągowych, zawierają się w granicach 2500 do 5000 A. Uwzględniając konieczność zapewnienia dwukrotnej przeciążalności w stanach dynamicznych, konieczne są przekształtniki o obciążalności prądowej 5000 do 10 000 A.

W Instytucie EMAG zostały opracowane i wdrożone w kilku maszynach przekształtniki tyrystorowe przeznaczone dla układów napędowych dużej mocy z silnikami prądu stałego, głównie do napędów maszyn wyciągowych. Ze względu na zapewnienie odpowiedniej przeciążalności w stanach dynamicznych wymagana obciążalność prądowa przekształtnika (przy prądzie znamionowym silnika 4000 A) wynosi 8000 A. W związku z tym przekształtnik przystosowany jest do pracy równoległej. Ponieważ połączenie równoległe, przy zasilaniu z jednego źródła, jest równoważne równoległemu połączeniu tyrystorów, dla symetryzacji obciążenia na zasilaniu obydwu prostowników zostały zastosowane dławiki wyrównawcze. Ze względu na odpowiedzialność realizowanych przez maszyny wyciągowe zadań i stawiane im wysokie wymagania pod względem niezawodności oraz bezpieczeństwa pracy, w skład przekształtnika, poza sterownikiem realizującym funkcje sterowania tyrystorów oraz regulacji prądu i prędkości, wchodzi również sterownik mikroprocesorowy, realizujący funkcje zabezpieczeń i sterowania przekształtnika. Sterowniki w zależności od konfiguracji napędu mogą sterować (oraz kontrolować) do czterech szaf prostownikowych. Aby zapewnić możliwość zasilania największych dwusilnikowych maszyn wyciągowych, możliwa jest konfiguracja szeregowo-równoległa przekształtników, co pozwala zasilac napędy o mocach 2×2400 kW oraz uzyskać dwunastopulsowy układ sterowania.

3. Układ sterowania

Układ sterowania przekształtnikowych napędów maszyn wyciągowych w części sterowania samego napędu przeznaczony jest w ogólności do tyrystorowych napędów przekształtnikowych, niezależnie od napędzanej maszyny. Układ, w zależności od konfiguracji obwodu głównego maszyny wyciągowej, może sterować od jednego do czterech przekształtników. Wyposażony w sterowniki mikroprocesorowe, realizuje funkcje fazowego sterowania tyrystorów przekształtnika, funkcje regulatorów prądu i prędkości oraz kontroluje prawidłową pracę przekształtników tyrystorowych.

W napędach prądu stałego silnik zasilany z przekształtnika tworzy obwód główny, przy czym w najprostszym przypadku stanowi go jeden przekształtnik sześciopulsowy sterujący jednym silnikiem. Układ może jednak być bardziej rozbudowany przez zastosowanie dwóch przekształtników połączonych szeregowo, tworzących układ dwunastopulsowy dla jednego silnika i dalej, dwa przekształtniki połączone naprzemiennie szeregowo z dwoma silnikami prądu stałego, tworząc tzw. układ

Punga. Tego typu układy napędowe dedykowane są do maszyn wyciągowych głównych wyciągów szybowych (wydobywczych).

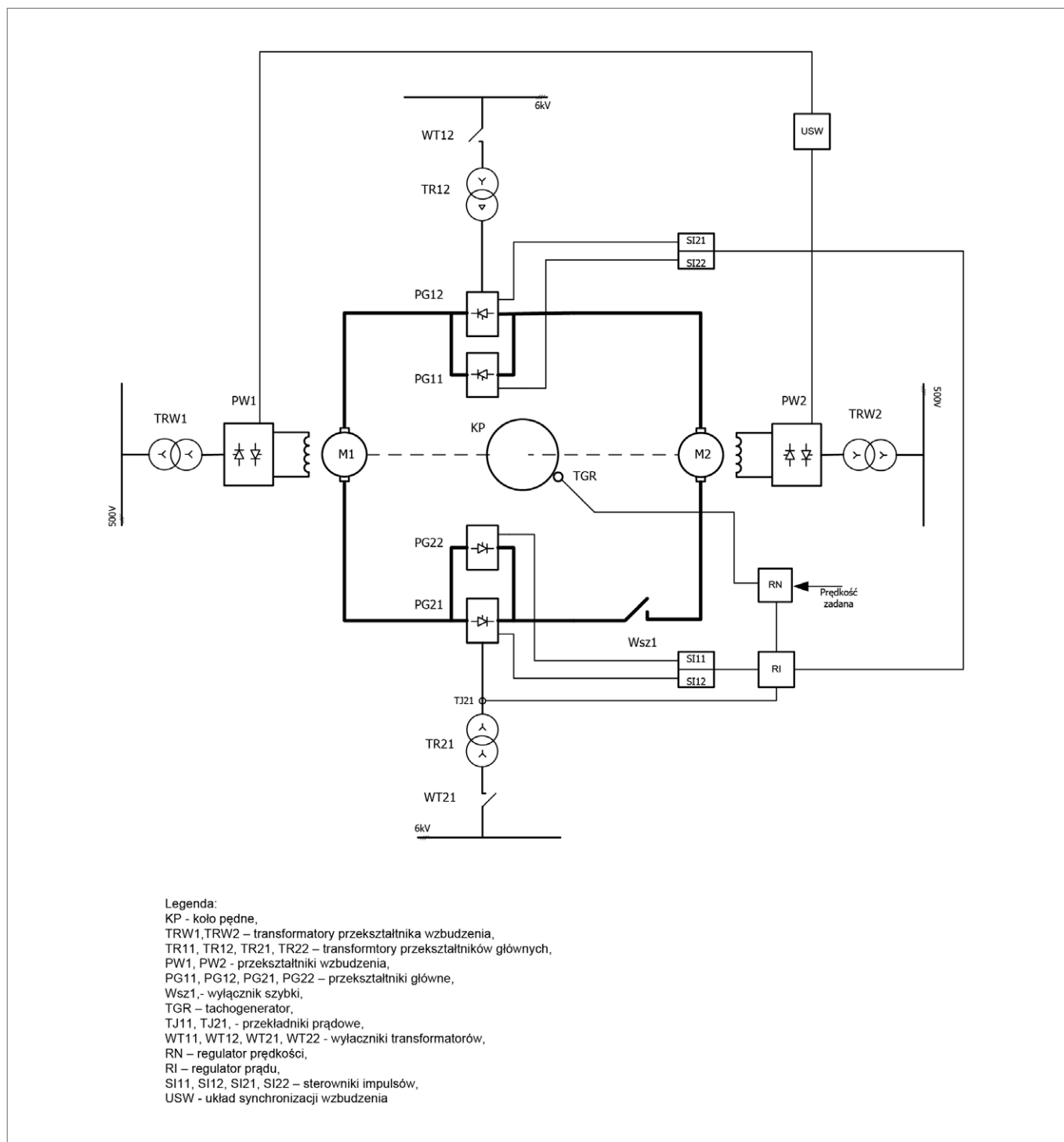
Zastosowany mikroprocesorowy układ sterujący umożliwia sterowanie maszyn wyciągowych w następujących konfiguracjach:

- maszyna jednosilnikowa, sterowanie sześciopulsowe;
- maszyna jednosilnikowa, sterowanie dwunastopulsowe;
- maszyna dwusilnikowa, z jednym obwodem głównym (układ Punga) sterowanie dwunastopulsowe jednoczesne lub kolejnościowe;
- maszyna dwusilnikowa, z dwoma obwodami głównymi, sterowanie dwunastopulsowe jednoczesne lub kolejnościowe.

W opisanych wyżej konfiguracjach układu napędowego możliwość pracy nawrotnej (praca czterokwadrantowa) uzyskano przez rewersję prądu wzbudzenia w silniku napędowym. Istnieją zasadniczo dwa rodzaje napędów nawrotnych: napędy z rewersją w obwodzie głównym oraz napędy z rewersją w obwodzie wzbudzenia. Rewersja w obwodzie głównym umożliwia uzyskanie nieco lepszych parametrów pracy napędu maszyny, jednak jej realizacja wymaga podwójnej ilości przekształtników w obwodzie głównym (a zatem na pełny prąd silnika) i jest w związku z tym znacznie kosztowniejsza niż rewersja w obwodzie wzbudzenia, która również wymaga przekształtników rewersyjnych, ale na znacznie mniejsze prądy. W obecnie modernizowanych maszynach, z wyżej wspomnianych względów ekonomicznych, częściej stosowane są układy z rewersją w obwodzie wzbudzenia.

Na rys. 2 przedstawiono strukturę układu napędowego maszyny dwusilnikowej z jednym obwodem głównym w tzw. układzie Punga, z rewersją w obwodzie wzbudzenia. Jest to struktura bardziej złożona niż napędy maszyn jednosilnikowych.

Dwunastopulsowa praca zapewnia właściwości, które przy wielkich mocach przetwarzania mają istotne znaczenie dla zmniejszenia oddziaływania przekształtnika tyrystorowego na sieć zasilającą – zmniejszenie odkształceń prądu zasilającego oraz zmniejszenie poboru i udarów mocy biernej indukcyjnej. Zastosowane oprogramowanie umożliwia sterowanie tyrystorów przekształtnika według algorytmu równoczesnego lub kolejnościowego (sterowanie sekwencyjne) [2]. Sterowanie równoczesne, przy którym pomiędzy impulsami połączonych szeregowo przekształtników jest stały kąt, wynikający z przesunięcia napięć zasilających (grupy połączeń transformatorów zasilających Y_d oraz Y_y bądź z grupy połączeń transformatora 3-uzwojeniowego $Y/d/y$), wynoszący 30° , zapewnia w całym zakresie regulacji korzystny dla silnika dwunastopulsowy przebieg napięcia zasilającego, jednak nie powoduje zmniejszenia poboru i udarów mocy biernej. Sterowanie sekwencyjne zapewnia zmniejszenie poboru i udarów mocy biernej, jednak powoduje płynne przechodzenie pomiędzy pracą dwunasto- i sześciopulsową [1], co oznacza zmienną ilość pulsów w napięciu i prądzie obwodu głównego napędu przekształtnikowego. Przy sterowaniu sekwencyjnym należy uwzględnić niebezpieczeństwo wzajemnego oddziaływania na siebie komutacji połączonych szeregowo przekształtników, z których jeden okresowo pracuje przy stałym maksymalnymysterowaniu falownikowym, podczas gdy w drugim kącieysterowania zmienia się. W sytuacji,



Rys. 2. Struktura układu napędowego maszyny dwusilnikowej z jednym obwodem głównym w układzie Punga

gdy obydwaj przekształtniki komutują w tym samym momencie, wskutek ich oddziaływania na siebie, kąty komutacji wydłużają się. Jest to niebezpieczne zwłaszcza w czasie hamowania, gdyż w przekształtniku pracującym w zakresie falownikowym (oddawanie energii do sieci) istnieje niebezpieczeństwo wystąpienia przewrotu, przy czym jest ono większe przy zasilaniu przekształtników z transformatora trójzwojowego.

Ze względu na odpowiedzialność realizowanych przez maszyny wyciągowe zadań i stawiane im wysokie wymagania pod względem niezawodności oraz bezpieczeństwa pracy, zostały

rozdzielone funkcje sterowania tyrystorów i regulacji oraz zabezpieczeń. W związku z tym układ sterowania przekształtnika złożony jest z dwóch (bądź nawet trzech) sterowników, z których jeden realizuje funkcje sterowania tyrystorów oraz regulacji prądu i prędkości, zaś drugi realizuje funkcje zabezpieczeń i sterowania przekształtnika. W celu ochrony przekształtnika mikroprocesorowy układ kontroli realizuje m.in. następujące zabezpieczenia:

- Kontrola prądu maksymalnego tyrystora. W celu ochrony przekształtnika przed przekroczeniem prądu maksymalnego

tyrystora układ zabezpieczeń kontroluje prąd płynący przez poszczególne grupy tyrystorów mostków przekształtnika. Każde przekroczenie dopuszczalnego maksymalnego prądu tyrystora jest wykrywane i sygnalizowane, ze wskazaniem na konkretny mostek oraz grupę, w której nastąpiło przetężenie.

- Kontrola nierównomiernego rozplywu prądu. W układzie równoległej pracy przekształtników duże znaczenie ma równomiernie obciążanie się poszczególnych grup tyrystorów pracujących równolegle. Układ kontroli równomierności obciążeń, na podstawie zmierzonych prądów, analizuje rozplyw prądu we wszystkich grupach tyrystorów przekształtnika. W przypadku pojawienia się nierównomiernego rozplywu prądu zdarzenie to jest sygnalizowane, ze wskazaniem na mostek oraz grupę, w której wystąpiła niesymetria.
- Kontrola składowej 50 Hz prądu. W przypadku nieprzewodzenia w przekształtniku jednej z faz w prądzie obwodu głównego pojawia się składowa okresowa o częstotliwości 50 Hz. W celu wykrywania tej składowej sygnał prądu głównego zostaje poddany obróbce w zrealizowanym cyfrowo filtrze i na jego podstawie układ kontroli sprawdza obciążenie poszczególnych faz przekształtnika.
- Kontrola temperatury tyrystorów oraz stanów bezpieczników. W celu ochrony tyrystorów przekształtnika przed przekroczeniem dopuszczalnej temperatury pracy, w każdym z modułów zastosowano układ kontroli temperatury radiatora. W warunkach wystąpienia przetężenia w obwodzie wyjściowym tyrystory w mostku przekształtnika są chronione bezpiecznikami szybkimi. Każdy bezpiecznik jest wyposażony w sygnalizator i mikrołącznik, dzięki którym można jednoznacznie zidentyfikować uszkodzony bezpiecznik.

W celu umożliwienia komunikacji z układami nadrzędnymi lub układem wizualizacji sterownik wyposażono w magistralę komunikacyjną CAN lub RS485 z protokołem MODBUS (opcjonalnie MODBUS TCP). Dodatkowo na elewacji szafy sterowniczej znajduje się graficzny pulpit operatorski, na którym wyświetlane są najistotniejsze w danym momencie informacje dotyczące stanu pracy napędu.

4. Wybrane zagadnienia z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej

Zastosowanie do sterowania przekształtników układów mikroprocesorowych z jednej strony umożliwia precyzyjne sterowanie tyrystorów przekształtnika, z drugiej jednak może być przyczyną większej wrażliwości układu sterowania na występujące w sieci zasilającej zaburzenia. W tym kontekście istotnego znaczenia nabiera kompatybilność elektromagnetyczna w zakresie odporności na zaburzenia, zwłaszcza niskiej częstotliwości. Wymagania w tym zakresie określa norma PN-EN 61800-3 „Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości. Część 3: Wymagania dotyczące EMC i specjalne metody badań”. Odnośnie do odporności na zaburzenia o niskiej częstotliwości norma wymienia: harmoniczne i załamania komutacyjne (odkształcenia napięcia), odchylenia napięcia (zmiany, zmiany skokowe, wahania) oraz asymetrię napięć i zmiany częstotliwości, podając graniczne wartości poszczególnych zaburzeń.

Zapewnienie odporności układu sterowania na harmoniczne i załamania komutacyjne, wymaga zastosowania filtru o od-

powiednio dobranych parametrach, na wejściu do sterownika napięć synchronizujących, który zapewniłby poprawną pracę układu tyrystorowego. W omawianym układzie sterowania przekształtnika tyrystorowego zastosowany został filtr LC drugiego rzędu (na wejściu napięcia synchronizującego modułu sterowania tyrystorów).

Odporność na odchylenia napięcia zasilającego ($\pm 10\%$), zapady i krótkotrwałe zaniki napięcia można zapewnić przez odpowiednie zaprojektowanie obwodów zasilania układów sterowania, a w szczególności przez odpowiedni zakres napięć zasilających zasilaczy i zastosowanie UPS.

Zapewnienie odporności na asymetrię napięć i zmiany częstotliwości (wg wyżej wspomnianej normy „brak błędów w działaniu tyrystorów”) uzyskuje się na drodze programowej, przez odpowiedni pomiar zmian fazy napięcia zasilającego przekształtnik (napięcia sieci) i zmian czasu trwania okresu tego napięcia, wynikających ze zmian częstotliwości. Zmiany te są na bieżąco uwzględniane w algorytmie bloku sterowania tyrystorów, generującego impulsy wyzwalań.


Zasygnalizowane wyżej zabiegi, podjęte dla uzyskania odporności na zaburzenia o niskiej częstotliwości, zostały przebadane w modelowym przekształtnikowym układzie napędowym oraz we wdrożonych napędach maszyn wyciągowych.

4. Podsumowanie

Opisany przekształtnik wykonano w oparciu o aktualnie produkowane wysokoprądowe tyrystory, co pozwoliło zminimalizować ilość łączonych równolegle elementów półprzewodnikowych. Zapewnia to podniesienie niezawodności pracy przekształtnika oraz umożliwia aplikacje do największych krajowych maszyn wyciągowych. Mikroprocesorowy układ sterowania realizuje funkcje sterowania i regulacji silnika oraz funkcje zabezpieczeń przekształtnika tyrystorowego, zapewniając, jak to już wspomniano wcześniej, łatwość konfigurowania układu regulacji, pozwalającą na dokładną realizację zadanego diagramu prędkości jazdy, możliwość przełączania struktury układu regulacji w trakcie jazdy w celu uzyskania optymalnych w danym momencie parametrów dynamicznych czy łatwo nastawę i kontrolę maksymalnych wartości prądu obwodu głównego. Zastosowane rozwiązania pozwalają na integrację cyfrowego układu sterowania silnika maszyny wyciągowej z nowoczesnymi cyfrowymi regulatorami jazdy.

Literatura

- [1] SZKLARSKI L., ZARUDZKI J.: *Elektryczne maszyny wyciągowe*. PWN, Warszawa 1998.
- [2] KALUS M., SKOCZKOWSKI T.: *Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.

 dr inż. Artur Kozłowski – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
mgr inż. Tomasz Gąsior – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
mgr inż. Jerzy Zdrzałek – Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

artykuł recenzowany